DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160742

裴雪霞, 党建友, 张定一, 王姣爱, 张晶, 董飞. 不同降水年型下播期对晋南旱地小麦产量和水分利用率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(4): 553−562

Pei X X, Dang J Y, Zhang D Y, Wang J A, Zhang J, Dong F. Impact of sowing date on yield and water use efficiency of wheat in different precipitation years in dryland of South Shanxi[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(4): 553−562

不同降水年型下播期对晋南旱地小麦产量和水分利用率的影响*

裴雪霞, 党建友**, 张定一, 王姣爱, 张　晶, 董　飞

(山西省农业科学院小麦研究所　临汾　041000)

摘　要: 根据近 54 年来山西省临汾市逐日降水量, 将 7 个试验年份分为丰水年型、平水年型和枯水年型, 研究了不同年型不同播期对旱地小麦关键生育期持续时间、降水、积温、日照时数、小麦产量及籽粒水分利用效率的影响, 并进行相关、多元回归和通径分析, 为旱地小麦稳产高产提供理论依据和技术支撑。结果表明, 播期对小麦生育期持续时间的影响主要表现在苗期、分蘖期和起身拔节期, 而对抽穗期和成熟期影响最多仅相差 1 d。旱地小麦全生育期持续时间与积温显著正相关。降水年型显著影响旱地小麦产量及其构成因素, 相同降水年型下降水分布不同小麦产量也有较大差异, 丰水年型旱地小麦产量较平水年型和枯水年型分别提高 100.0%和 135.9%。籽粒水分利用率为丰水年型>枯水年型>平水年型, 丰水年型和枯水年型下, 籽粒水分利用率随播期推迟而升高, 平水年型下, 籽粒水分利用率随播期推迟先升高后降低。在拔节—抽穗期, 小麦产量与积温显著负相关, 与日照时数极显著负相关, 与降水量极显著正相关; 在抽穗—成熟期, 产量与积温、日照时数均呈极显著正相关。年降水量及其分布是影响旱地小麦稳产高产的关键, 丰水年型适播期在 10 月 4 日左右, 产量构成因素协调, 可获得高产, 同时生育期耗水量最少, 水分利用率较高; 平水年型和枯水年型适播期应在 9 月 28 日左右, 产量最高, 水分利用率也较高。随播期推迟, 应适当加大播量。

关键词: 旱地小麦; 降水年型; 气象因子; 产量; 水分利用率

中图分类号: S181　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1671-3990(2017)04-0553-10

Impact of sowing date on yield and water use efficiency of wheat in different precipitation years in dryland of South Shanxi*

PEI Xuexia, DANG Jianyou**, ZHANG Dingyi, WANG Jiao'ai, ZHANG Jing, DONG Fei

(Wheat Research Institute, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Linfen 041000, China)

Abstract: Sowing date affects individual development before winter, population quality and yield of wheat. Planting area of wheat in dryland of South Shanxi accounts for 60% total area of the province. The precipitation in the area plays an important role in ensuring agriculture production and food security in Shanxi Province. Under global warming conditions, research on proper sowing date of wheat in Shanxi Province is significant for sustainable development of agriculture. Seven years from

* 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-03-2-7)和国家科技支撑计划项目(2015BAD22B03-03)资助
** 通讯作者: 党建友, 主要研究方向为作物节本增效高产栽培。E-mail: dangjyou8605@sina.com
裴雪霞, 主要研究方向为小麦玉米稳产高产高效栽培。E-mail: peixuexia@163.com
收稿日期: 2016-08-22　接受日期: 2017-01-19

* The study was supported by the Special Fund for the Industrial Technology System Construction of Modern Agriculture of China (CARS-03-2-7) and the National Key Technology R&D Program of China (2015BAD22B03-03).
** Corresponding author, E-mail: dangjyou8605@sina.com
Received Aug. 22, 2016; accepted Jan. 19, 2017

2008 to 2015 were divided into three kinds of precipitation year types — wet precipitation year (2012, 2014 and 2015, precipitation of 527.8–597.2 mm), normal precipitation year (2011, 2013, precipitation of 450.7–483.3 mm) and dry precipitation year (2009, 2010, precipitation of 293.4–385.4 mm), based on the average annual precipitation of Linfen in Shanxi Province in the past 54 years. Precipitation, accumulated temperature, sunshine duration during wheat growth season, as well as wheat growth duration, yield and water use efficiency (WUE) under three sowing dates (Sep. 20, 30 and Oct. 5 in 2008–2009; Sep. 22, 28, and Oct. 4 in 2009–2015) were analyzed to provide a theoretical basis and technological support for high and stable yield production of dryland wheat. The relationship between yield, yield components, WUE and meteorological factors were also analyzed by correlation, multiple regression and path analysis. Results showed that sowing dates significantly affected seedling, tillering and jointing period duration, while no significant effect was observed at booting and maturing stages. There was a significantly positive relationship between wheat growth duration and accumulated temperature. Precipitation year and precipitation distribution in wheat growth season affected wheat yield and yield components significantly. Yield in wet precipitation years were 100.0% and 135.9% higher than those in normal and dry precipitation years, respectively. For different precipitation year types, WUE of grain were wet precipitation year > dry precipitation year > normal precipitation year. WUE of grain were increased with the delay of sowing date in wet and dry precipitation years, but was increased when sowed before Sep. 28 and then decreased in the normal precipitation year. From jointing to heading stage, wheat yield was negatively related with accumulated temperature and sunshine duration, positively related with precipitation. From heading to maturing stage, it positively correlated with accumulated temperature and sunshine duration. There was a positive relationship between yield, yield components and water consumption, but no significant relationship between WUE and meteorological factors and yield components. Annual precipitation and its distribution were the key factors determining high and stable wheat yield in dryland. In wet years, Oct. 4 was a suitable sowing date, which was beneficial for coordinative yield components, high yield and WUE, and low water consumption of wheat. In normal and dry years, Sep. 28 was more suitable for higher yield and WUE of wheat.

Keywords: Dry land wheat; Precipitation year; Meteorological factors; Yield; Water use efficiency

山西省属暖温带、温带大陆性气候，处于黄土高原半干旱区，年降水量 400~600 mm，受大陆性季风气候影响，降水时空分布不均，其中 60%左右集中在休闲期(7—9 月)，冬春少雨雪、多风，0~20 cm 土层蒸发量大，小麦生育期“十年九旱”名副其实[1-2]。小麦是我国最主要的口粮作物[3]，山西旱地小麦种植面积占全省总面积的 60%，干旱缺水是制约产量的关键因素，发展旱作农业，研究全球气候变暖背景下小麦适播期和播量，保证旱地农业的可持续发展是我国农业发展的重大课题[2,4]。不同播期，小麦生育期温度、光照等生态条件均有差异，对产量构成因素和水分利用效率有显著影响[1]。张敏等[5]研究表明，播期推迟，小麦成穗率增加，但成穗数显著降低，籽粒产量下降，籽粒中蛋白质含量提高，蛋白质组分发生变化。李彩虹等[6]、赵青松等[7]研究表明，播期影响小麦叶绿素含量的冠层光谱模型拟合程度，播期播量对小麦籽粒产量影响显著。裴雪霞等[8]研究表明，暖冬条件下，播期过早，气温连续偏高，易引起冬前小麦旺长，生育期提前，个体偏弱，群体质量下降，产量降低；播期过晚，气温偏低，冬前小麦个体偏弱，群体质量差，穗数少，产量降低。徐成忠、白洪立等[9-10]针对积温变迁研究了小麦玉米一年两熟制下冬小麦和夏玉米的适宜播期。目前播期对小麦生长发育及产量的影响研究较多[8,11-13]，但不同降水年型下适宜播期临界期研究少见报道。本研究针对山西省南部丘陵旱地降水主要分布在小麦休闲期，且年际间年降水量波动大的特点[14-17]，连续 7 年(2008—2015 年)研究了不同播期对小麦生长发育及产量的影响。通过不同降水年型、不同播期下旱地小麦不同生育期积温、降水及日照时数、产量、水分利用率及其相关性分析，摸清制约旱地小麦籽粒产量、水分利用率等的关键气候参数，以期为旱地小麦稳产高产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区基本情况

试验于 2008 年 9 月至 2015 年 6 月，在山西省临汾市尧都区大阳镇岳壁村丘陵旱地进行。试验地位于 36°05.520′N, 111°45.727′E，海拔 693.5 m；年均气温 12.6 ℃，年降水 430~550 mm，无灌溉条件，一年 1 作小麦。试验地为壤质石灰性褐土，2008 年播前测定 0~20 cm 耕层土壤含有机质 9.08 g·kg^{-1}、碱解氮 39.29 mg·kg^{-1}、速效磷 20.32 mg·kg^{-1}、速效钾 128.64 mg·kg^{-1}。试验区降水情况见表 1。

采用国内较常用的降水年型划分标准[18]划分试验年份的降水年型。丰水年：$P_i>P+0.33\delta$；枯水年：$P_i<P-0.33\delta$。式中：P_i 为当年降水量(mm)；P 为多年平均降水量(mm)；δ 为多年降水量的均方差(mm)。根

表 1　2008—2015 年试验区降水分布

Table 1　The precipitation from 2008 to 2015 in the study area　　mm

年份 Year	月 Month												生育期 Wheat growth period precipitation	年降雨量 Annual precipitation
	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6—9		
2008—2009	62.4	33.3	61.0	70.2	9.1	4.3	0.0	0.0	21.5	13.5	10.1	100.0	226.9	158.5	385.4
2009—2010	25.5	0.0	79.7	46.1	24.1	35.3	1.1	0.0	10.4	4.0	36.3	30.9	151.3	142.1	293.4
2010—2011	7.8	97.9	211.9	33.9	16.5	0.2	0.0	0.6	16.2	5.3	19.0	41.4	351.5	99.2	450.7
2011—2012	13.0	91.2	93.8	134.7	36.5	62.0	0.9	2.5	0.8	16.6	39.9	35.9	332.7	195.1	527.8
2012—2013	28.6	125.1	136.6	62.2	8.6	9.9	5.3	2.4	5.1	2.7	14.9	81.9	352.5	130.8	483.3
2013—2014	29.5	285.9	43.3	39.3	23.8	4.3	0.0	0.0	23.2	11.3	65.3	71.3	398.0	199.2	597.2
2014—2015	32.8	62.4	140.4	182.4	17.7	7.7	0.0	7.7	7.7	4.8	39.2	33.5	418.0	118.3	536.3
1962—2015 均值 Average from 1962 to 2015	43.5	113.8	97.0	85.5	27.0	12.3	3.8	3.7	8.8	10.1	26.6	49.9	335.0	143.2	478.2

据山西省临汾市 54 年降水资料，年降水量均方差 δ 为 105.3 mm，年均降水量 P 为 478.2 mm。丰水年年降水量为 512.9 mm 以上，枯水年年降水量为 443.5 mm 以下。因此，试验区 2009 年和 2010 年为枯水年，2012 年、2014 年和 2015 年为丰水年，其余 2 年为平水年。

1.2　试验设计

设 3 个播期处理，2008—2009 年为：9 月 20 日播种、播量 112.5 kg·hm^{-2}，9 月 30 日播种、播量 165.0 kg·hm^{-2}，10 月 5 日播种、播量 187.5 kg·hm^{-2}。2009—2015 年为：9 月 22 日播种、播量 112.5 kg·hm^{-2}，9 月 28 日播种、播量 150.0 kg·hm^{-2}，10 月 4 日播种、播量 187.5 kg·hm^{-2}。每年均施 N 150 kg·hm^{-2}、P_2O_5 120 kg·hm^{-2}、K_2O 60 kg·hm^{-2}，播前随整地一次性施入；供试品种为国审麦‘晋麦 92 号’(2008—2012 年度为新品系‘临 Y8159’，2013 年通过国审，命名为‘晋麦 92 号’)。小区面积 7 m×20 m=140 m^2，3 次重复。

1.3　测定项目与方法

1.3.1　小麦生育期积温、日照时数和降水量

气象资料源于国家气象信息中心(网址：http://www.nmic.cn/)国家基准站点山西省临汾市 2008—2015 年逐日平均气温、日照时数和降水量资料。

1.3.2　小麦产量构成因素及籽粒产量

小麦成熟期每个处理随机取 3 个行长 20 cm 单行全部植株，去除穗粒数小于 6 粒单株后，其余成穗的茎数计数为有效成穗数，数取所有籽粒数，求平均值为穗粒数；每个处理随机收获 5 个 1.0 m^2 样方，脱粒，风干后称重，换算成籽粒产量；数取 500 粒称重，换算成千粒重，2 次重复(重复间相差≤0.5 g)。

1.3.3　籽粒水分利用效率

播种和收获当天用土钻取 0~200 cm(每 20 cm 一层)土样，铝盒烘干法测定土壤含水量，计算公式为：

$$W = w \times \rho_s \times h \times 0.1 \quad (1)$$

式中：W 为土层蓄水量(mm)，w 为土层含水量(%)，ρ_s 为土壤容重(g·cm^{-3})，h 为土层厚度(cm)，0.1 为单位换算系数。

生育期耗水量(mm)＝播前 0~200 cm 土壤蓄水量+降水量−收获期 0~200 cm 土壤蓄水量　(2)

籽粒水分利用效率($WUE_{籽粒}$)=籽粒产量/生育期耗水量　(3)

1.4　数据处理

用 Microsoft Excel 对小麦生育期积温、日照时数和降水量数据进行统计计算，用 DPS 15.10 进行方差分析、相关性分析和逐步回归分析。

2　结果与分析

2.1　不同播期下小麦生育阶段持续时间、积温、日照时数和降水量

从表 2 和表 3 知，在试验年份播期范围内，不同播期的小麦各生育时期出现的时间、持续时间、积温、日照时数和降水量各不相同。播期早，则生育期长，总积温值高，日照时数长，降水量多。播期对小麦生育时期持续时间的影响，主要表现在苗期、分蘖期和拔节期，对抽穗期和成熟期影响较小。随播期推迟，播种—出苗期、出苗—分蘖期持续时间均加长；播种—出苗期所需积温明显增加，出苗—分蘖期所需积温差异较小；分蘖—拔节期持续时间明显缩短，积温和日照时数均减少。降水年型对旱地小麦各生育时期出现的时间、持续时间、积温、日照时数和降水量影响较小。

各生育阶段持续时间与积温、日照时数、降水量间的相关性分析结果表明，播种—出苗期持续时间与此阶段积温呈极显著正相关(r=0.712**)；分蘖—拔节期、拔节—抽穗期持续时间与日照时数呈极

表 2　不同播期和不同降水年型下小麦各生育时期出现及持续时间

Table 2　The date and duration of each growth stage of wheat sowed in different dates in different precipitation years

降水年型 Precipitation year type	年度 Year	播期(月-日) Sowing date (month-day)	播种—出苗 Sowing–seedling		出苗—分蘖 Seedling–tillering		分蘖—拔节 Tillering–jointing		拔节—抽穗 Jointing–heading		抽穗—成熟 Heading–maturity		全生育期 Total growth period
			出苗期(月-日) Seedling stage (month-day)	天数 Days	分蘖期(月-日) Tillering stage (month-day)	天数 Days	拔节期(月-日) Jointing stage (month-day)	天数 Days	抽穗期(月-日) Heading stage (month-day)	天数 Days	成熟期(月-日) Maturity (month-day)	天数 Days	
枯水年 Dry year	2009	09-20	09-27	7	10-08	11	03-19	162	04-22	34	06-02	41	255
		09-30	10-08	8	10-19	11	03-21	153	04-22	32	06-02	41	245
		10-05	10-14	9	10-26	12	03-23	148	04-23	31	06-02	40	240
	2010	09-22	09-28	6	10-07	9	03-18	162	04-26	39	06-10	45	261
		09-28	10-04	6	10-16	12	03-20	155	04-26	37	06-10	45	255
		10-04	10-12	8	10-24	12	03-22	149	04-27	36	06-10	44	249
平水年 Normal year	2011	09-22	09-29	7	10-09	10	04-04	177	04-30	26	06-07	38	258
		09-28	10-06	8	10-17	11	04-06	171	04-30	24	06-07	38	252
		10-04	10-12	8	10-23	11	04-09	168	04-30	21	06-07	38	246
	2013	09-22	09-28	6	10-08	10	03-11	154	04-16	36	05-27	41	247
		09-28	10-05	7	10-15	10	03-13	149	04-16	34	05-27	41	241
		10-04	10-11	7	10-24	13	03-16	143	04-17	32	05-27	40	235
丰水年 Wet year	2012	09-22	09-29	7	10-10	11	03-26	168	04-23	28	06-06	44	258
		09-28	10-06	8	10-17	11	03-28	163	04-23	26	06-06	44	252
		10-04	10-12	8	10-25	13	04-01	158	04-24	24	06-06	43	246
	2014	09-22	09-29	7	10-08	9	03-18	161	04-18	31	06-05	48	256
		09-28	10-04	6	10-13	9	03-19	157	04-18	30	06-05	48	250
		10-04	10-10	6	10-22	12	03-21	150	04-19	29	06-05	47	244
	2015	09-22	09-28	6	10-08	10	03-18	161	04-17	30	06-01	45	252
		09-28	10-05	7	10-16	11	03-20	155	04-17	28	06-01	45	246
		10-04	10-11	7	10-23	12	03-22	150	04-18	27	06-01	44	240

显著或显著正相关(r=0.659**和 r=0.440*)；抽穗—成熟期持续时间与此阶段积温和日照时数间呈极显著正相关(r=0.883**和 r=0.751**)；全生育期持续时间与积温呈显著正相关(r=0.462*)，与降水量间相关性均未达显著水平。

2.2　不同降水年型和播期小麦产量及产量构成因素

由表 4 知，年降水量对旱地小麦产量及其构成影响较大，其中丰水年型>平水年型>枯水年型，丰水年型产量明显高于其他年型。从产量构成因素看，丰水年型成穗数显著高于平水年型和枯水年型，是影响旱地小麦产量的主要因素；穗粒数也高于平水年型和枯水年型；千粒重与平水年型相近。

丰水年型下，2012 年和 2015 年，小麦成穗数和产量随播期推迟及相应播种量的增加而增加，2014 年 9 月 28 日播种最高；2014 年和 2015 年穗粒数随播期推迟而减少，2012 年则相反；千粒重随播期推迟而增加。平水年型和枯水年型下，小麦成穗数和产量随播期推迟先升高后降低，9 月 28 日播种最高，除 2011 年外，早播成穗数和产量均最低；穗粒数随播期推迟而增加(除 2010 年度 9 月 28 日播种最高外)；千粒重随播期推迟变化规律不明显。

降水在年度间的分布对旱地小麦产量也有较大影响，其中 2014 年属丰水年型，生育期降水量 199.2 mm，4—5 月降水较多(136.6 mm)，有利于穗粒数增加和籽粒灌浆，穗粒数和千粒重高，因此产量最高；2013 年属平水年型，但小麦生育期降水仅 130.8 mm，且集中在 5 月下旬(76.2 mm)，为无效降水，因此产量最低。

2.3　不同降水年型和播期下小麦籽粒水分利用效率

由表 5 知，生育期耗水量与年降水量密切相关，总体上，生育期耗水量表现为：丰水年型>平水年型>枯水年型，同时，小麦生育期耗水量均随播期推迟而降低。籽粒水分利用率为丰水年型>枯水年型>平水年型，丰水年型和枯水年型下，籽粒水分利用率随播期推迟而升高，平水年型下，籽粒水分利用率随播期推迟先升高后降低。

降水量、土壤贮水量与生育期耗水量和水分利用效率相关性分析表明，小麦生育期耗水量与休闲期

表 3　不同年份不同播期的小麦各生育时期积温、日照时数和降水量

Table 3　Accumulated temperature, sunshine duration and precipitation at different growth stages of wheat sowed in different dates in different precipitation years

年度 Year	播期 (月-日) Sowing date (month-day)	播种—出苗 Sowing–seedling			出苗—分蘖 Seedling–tillering			分蘖—拔节 Tillering–jointing			拔节—抽穗 Jointing–heading			抽穗—成熟 Heading–maturity			全生育期 Total growth period		
		积温 Accumulative temperature (℃)	日照 Sunshine duration (h)	降水 Precipitation (mm)	积温 Accumulative temperature (℃)	日照 Sunshine duration (h)	降水 Precipitation (mm)	积温 Accumulative temperature (℃)	日照 Sunshine duration (h)	降水 Precipitation (mm)	积温 Accumulative temperature (℃)	日照 Sunshine duration (h)	降水 Precipitation (mm)	积温 Accumulative temperature (℃)	日照 Sunshine duration (h)	降水 Precipitation (mm)	积温 Accumulative temperature (℃)	日照 Sunshine duration (h)	降水 Precipitation (mm)
2009	09-20	123.9	0.0	54.5	175.0	61.2	6.5	757.1	765.9	44.7	515.5	228.3	7.4	820.4	306.9	102.9	2 391.9	1 362.3	216.0
	09-30	131.3	47.5	3.5	179.9	61.2	0.0	607.0	704.7	44.8	485.7	228.3	7.3	820.4	306.9	102.9	2 224.3	1 348.6	158.5
	10-05	130.6	34.4	1.8	175.2	74.8	5.2	552.6	687.5	39.6	471.4	208.3	10.2	805.3	306.9	100.0	2 135.1	1 311.9	156.8
2010	09-22	123.5	42.4	0.2	175.2	66.1	4.1	593.3	694.7	69.4	471.4	237.8	37.7	933.5	332.2	35.4	2 296.9	1 373.2	146.8
	09-28	124.0	48.2	0.0	183.3	52.7	20.2	488.5	676.2	53.3	444.1	221.5	37.7	933.5	332.2	35.4	2 173.4	1 330.8	146.6
	10-04	125.6	17.9	20.2	169.0	97.9	0.0	399.8	619.5	53.3	433.5	226.6	37.7	921.5	320.7	35.4	2 049.4	1 282.6	146.6
2011	09-22	115.6	40.3	3.0	169.5	76.1	0.6	661.4	1 061.2	43.4	461.7	241.8	13.8	809.2	306.8	44.2	2 217.4	1 726.2	105.0
	09-28	129.4	58.1	0.6	180.5	67.0	5.8	556.9	1 022.0	39.2	442.5	236.8	12.2	809.2	306.8	44.2	2 118.5	1 690.7	102.0
	10-04	136.9	52.4	5.8	170.3	60.1	0.0	506.1	1 025.7	39.2	400.5	207.3	12.2	809.2	306.8	44.2	2 023.0	1 652.3	101.4
2013	09-22	115.3	31.3	4.3	170.5	62.8	3.5	604.4	711.4	27.8	490.9	271.3	11.3	906.1	257.0	86.4	2 287.2	1 333.8	133.3
	09-28	118.7	55.0	3.5	169.5	51.4	0.1	510.2	676.7	27.7	467.4	262.4	11.3	906.1	257.0	86.4	2 171.9	1 302.5	129.0
	10-04	118.1	44.0	0.3	173.0	69.5	5.0	434.9	636.9	23.5	460.3	258.4	10.5	884.0	246.4	86.4	2 070.3	1 255.2	125.7
2012	09-22	126.0	45.8	12.5	179.0	54.9	13.6	641.0	614.1	103.1	439.5	224.0	10.7	955.7	304.1	67.7	2 341.2	1 242.9	207.6
	09-28	126.4	40.9	0.1	173.3	70.9	25.5	566.5	578.4	91.1	411.3	209.9	10.7	955.7	304.1	67.7	2 233.2	1 204.2	195.1
	10-04	131.9	35.3	24.5	177.2	83.3	11.1	511.6	575.7	83.6	378.3	181.4	39.9	937.7	301.8	35.9	2 136.7	1 177.5	195.0
2014	09-22	117.7	40.2	11.4	179.1	68.8	0.0	735.7	677.7	52.9	476.4	192.5	67.4	967.7	391.6	78.9	2 476.6	1 370.8	210.6
	09-28	120.9	44.0	0.0	177.5	75.8	0.0	649.8	638.0	52.9	463.2	189.4	67.4	967.7	391.6	78.9	2 379.1	1 338.8	199.2
	10-04	117.7	50.7	0.0	175.9	70.5	15.7	556.5	612.7	37.2	455.3	170.7	68.9	952.8	390.2	77.4	2 258.2	1 294.8	199.2
2015	09-22	119.6	19.9	20.6	176.6	48.8	8.9	845.1	659.9	35.5	398.9	180.2	26.0	933.8	338.6	47.8	2 474.0	1 247.4	138.8
	09-28	124.0	31.4	8.9	169.1	38.3	0.0	752.1	645.5	35.5	375.4	173.7	26.0	933.8	338.6	47.8	2 354.4	1 227.5	118.2
	10-04	122.8	35.5	0.0	169.5	18.5	8.3	673.0	657.8	27.2	362.9	155.6	30.8	918.5	338.6	43.0	2 246.7	1 206.0	109.3

表 4 不同播期不同降水年型的小麦产量及构成因素

Table 4 Yield and yield components of wheat sowed in different dates in different precipitation years

降水年型 Precipitation year type	年份 Year	播期(月-日) Sowing date (month-day)	成穗数 Spikes number ($\times10^4\cdot hm^{-2}$)	穗粒数 Kernels per spike	千粒重 1000-kernel weight (g)	产量 Yield ($kg\cdot hm^{-2}$)
枯水年型 Dry year	2009	09-20	244.5±9.5aA	19.1±1.0cC	31.86±0.16bB	1 422.0±129.0bB
		09-30	286.0±5.0aA	20.2±1.0bB	38.31±0.58aA	2 623.3±86.2aA
		10-05	246.5±5.5aA	21.4±1.3aA	38.19±0.50aA	2 382.4±394.3aA
		平均 Average	259.0	20.2	36.12	2 142.6
	2010	09-22	187.5±4.2bB	36.9±0.1bB	32.97±0.09cC	2 376.0±92.3cC
		09-28	207.0±1.2aA	39.9±0.2aA	35.05±0.11aA	2 785.5±101.0aA
		10-04	189.0±3.1bB	37.0±0.3bB	33.71±0.08bB	2 665.5±102.1bB
		平均 Average	194.5	37.9	33.91	2 609.0
平水年型 Normal year	2011	09-22	333.0±28.0bB	30.0±1.2bB	38.7±0.07bB	3 534.0±119.3bB
		09-28	400.5±24.1aA	30.0±1.1bB	37.3±0.12cC	4 041.0±101.1aA
		10-04	327.0±11.1cC	35.5±0.5aA	43.1±0.02aA	3 193.5±208.0cB
		平均 Average	353.5	32.2	39.70	3 589.5
	2013	09-22	246.5±11.7aA	23.5±0.4cB	42.32±0.16aA	1 831.5±72.0cB
		09-28	267.0±9.9aA	24.7±0.7bAB	41.54±0.10bB	2 203.5±24.0aA
		10-04	258.0±13.1aA	26.1±0.3aA	41.20±0.12cB	2 005.5±67.5bAB
		平均 Average	257.2	24.8	41.69	2 013.5
丰水年型 Wet year	2012	09-22	396.0±11.3cC	33.0±0.4cB	40.16±0.08bA	5 068.5±102.1cC
		09-28	429.0±16.2bB	35.9±0.5bA	41.81±1.03aA	5 359.5±97.6bB
		10-04	468.0±6.9aA	36.7±0.1aA	41.69±0.23aA	5 761.5±53.6 aA
		平均 Average	431.0	35.2	41.22	5 396.5
	2014	09-22	421.5±3.0aA	42.8±1.5aA	46.29±0.54bB	6 534.0±103.5aAB
		09-28	435.0±12.0aA	39.0±0.3bBA	47.95±1.29abA	6 676.5±186.0aA
		10-04	306.0±19.5bB	36.6±0.7bB	48.40±0.56aA	6 277.5±60.0bB
		平均 Average	387.5	39.5	47.55	6 496.0
	2015	09-22	525.6±3.8cC	36.8±1.2aA	36.60±0.24aA	4 699.5±66.5bB
		09-28	543.9±6.7bB	34.4±1.1cB	36.57±0.36aA	4 702.5±55.9bB
		10-04	596.7±9.5aA	35.0±0.9bB	37.37±0.95aA	5 355.0±72.3aA
		平均 Average	555.4	35.4	36.85	4 919.0

同一年度不同大、小写字母分别表示差异达 0.01 和 0.05 显著水平。Different capital and lowercase letters mean significant differences at 0.01 and 0.05 levels in the same year.

降水量、年降水量、播前土壤贮水量均呈极显著正相关(r=0.589**, 0.686**, 0.843**)，籽粒水分利用效率与降水量及土壤贮水量间相关性均未达显著水平。

2.4 小麦生育阶段积温、日照时数、降水量与产量及其构成因素的相关性

由表 6 知，旱地小麦产量与拔节—抽穗期的积温和日照时数间分别呈显著和极显著负相关，与降水量呈极显著正相关，与灌浆期的积温、日照时数均呈极显著正相关。在产量构成因素方面：成穗数与分蘖拔节期的积温呈极显著正相关，与拔节—抽穗期的积温和日照时数呈极显著负相关。穗粒数与拔节—抽穗期日照时数极显著负相关，与灌浆期积温、日照时数呈极显著正相关，与该时段降水量极显著负相关。千粒重仅与拔节—抽穗期的降水量显著正相关。生育期耗水量与生育期积温显著正相关，与拔节—抽穗期的积温和日照时数呈显著负相关，与分蘖期和拔节抽穗期的降水量均呈显著正相关，与灌浆期的积温极显著正相关。产量与产量构成三因素、生育期耗水量间均呈极显著正相关，生育期耗水量还与成穗数和穗粒数呈极显著正相关。

逐步回归分析表明，总日照时数和成穗数对籽粒产量的直接通径系数较高(0.772 和 0.529)，成穗数主要通过拔节抽穗期日照时数间接影响产量(间接通径系数=0.236)；籽粒产量、拔节抽穗期降水量、灌浆期降水量对籽粒水分利用效率的直接通径系数较高(2.788、3.165 和 4.657)，产量主要通过拔节—抽穗期的降水量和积温间接影响水分利用率(间接通径系数=2.108 和 1.706)。

表 5　不同播期不同降水年型的小麦籽粒水分利用效率及生育期水分平衡

Table 5　Water use efficiency (WUE) of grains and water balance during growing period of wheat sowed in different dates in different precipitation years

降水年型 Precipitation year type	年份 Year	播期(月-日) Sowing date (month-day)	播前储水量 Water storage capacity before sowing (mm)	有效降雨量 Effective precipitation (mm)	收获期储水量 Water storage capacity after harvest (mm)	生育期总耗水量 Water consumption (mm)	WUE (kg·hm^{-2}·mm^{-1})
枯水年型 Dry year	2009	09-20	240.34±10.30aA	216.0	278.40±20.16cC	177.94±8.67aA	7.99±0.51cB
		09-30	240.47±12.60aA	158.5	289.53±16.27bB	109.44±6.94bB	23.97±1.26bA
		10-05	240.46±11.40aA	156.8	302.79±19.52aA	94.47±7.33cC	25.22±1.08aA
		平均 Average	240.42	177.1	290.24	127.28	19.06
	2010	09-22	316.78±11.68bB	146.6	170.87±16.58cC	292.51±10.23aA	8.12±0.29cC
		09-28	327.12±12.61aA	146.4	179.45±13.24bB	291.07±11.26aA	9.47±0.45bB
		10-04	308.52±10.31cC	146.4	193.89±15.22aA	261.03±8.35bB	10.21±0.39aA
		平均 Average	317.47	146.5	181.40	281.54	9.27
平水年型 Normal year	2011	09-22	360.94±18.21aA	105.1	220.75±10.63cB	245.29±12.34aA	14.41±1.02cB
		09-28	356.58±14.26abA	102.0	227.73±14.20bB	230.85±16.25bB	17.50±1.33aA
		10-04	353.46±17.33bA	101.4	243.20±13.55aA	211.66±11.01cC	15.09±1.00bB
		平均 Average	356.99	102.8	230.56	229.27	15.67
	2013	09-22	418.46±16.94aA	133.3	285.24±12.38bB	266.52±10.26aA	6.87±0.26cC
		09-28	408.92±18.24bB	129.0	292.41±15.64aA	245.51±10.00bB	8.98±0.42aA
		10-04	399.69±16.11cC	129.0	280.20±14.36cB	242.49±8.26bB	8.07±0.53bB
		平均 Average	409.02	130.4	285.95	251.51	7.97
丰水年型 Wet year	2012	09-22	442.15±15.24aA	207.6	228.26±12.99bA	421.49±20.16aA	12.03±1.06cC
		09-28	437.22±16.27bB	195.1	233.10±13.54aA	399.22±19.25bB	13.02±1.21bB
		10-04	431.60±13.74cC	195.0	230.82±15.63abA	395.78±17.36bB	14.55±0.95aA
		平均 Average	436.99	199.2	230.73	405.50	13.20
	2014	09-22	444.22±13.28aA	210.7	246.24±12.28bB	408.68±17.56aA	15.99±0.95cC
		09-28	427.80±12.45bB	199.2	247.55±16.94bB	379.45±16.21bB	17.60±1.03bB
		10-04	412.21±15.69cC	199.2	281.67±11.36aA	329.74±10.28cC	19.04±0.99aA
		平均 Average	428.08	203.0	258.49	372.62	17.54
	2015	09-22	515.16±20.04aA	138.8	250.87±20.13abA	403.09±18.69aA	11.66±1.00cC
		09-28	460.30±18.26bB	129.8	259.64±18.64aA	330.46±12.34bB	14.23±0.67bB
		10-04	436.99±9.25cC	109.3	242.20±9.58bA	304.09±10.28cC	17.61±1.63aA
		平均 Average	470.82	126.0	250.90	345.88	14.50

同一年度不同大、小写字母分别表示差异达 0.01 和 0.05 显著水平。Different capital and lowercase letters mean significant differences at 0.01 and 0.05 levels in the same year.

表 6　小麦不同生育阶段积温、日照时数、降水量与产量及构成因素的相关系数

Table 6　Correlation coefficients between yield, yield components, and accumulated temperature, sunshine duration and precipitation during different growth stages of wheat

	参数 Parameter	全生育期 Growth stage	播种—出苗 Sowing–seedling	出苗—分蘖 Seedling–tillering	分蘖—拔节 Tillering–jointing	拔节—抽穗 Jointing–heading	抽穗—成熟 Heading–maturity
积温 Accumulated temperature	产量 Yield	0.400	−0.063	0.234	0.317	−0.476*	0.597**
	成穗数 Spikes number	0.398	0.036	−0.043	0.561**	−0.723**	0.315
	穗粒数 Kernels per spike	0.343	−0.071	0.185	0.210	−0.420	0.639**
	千粒重 1000-kernel weight	0.081	−0.209	0.060	−0.077	0.015	0.328
	生育期耗水量 Water consumption	0.490*	−0.299	0.141	0.288	−0.448*	0.858**
	水分利用率 Water use efficiency	−0.059	0.341	0.208	0.101	−0.034	−0.341

续表

参数 Parameter		全生育期 Growth stage	播种—出苗 Sowing–seedling	出苗—分蘖 Seedling–tillering	分蘖—拔节 Tillering–jointing	拔节—抽穗 Jointing–heading	抽穗—成熟 Heading–maturity
日照时数 Sunshine duration	产量 Yield	−0.204	0.212	−0.052	−0.264	−0.757**	0.713**
	成穗数 Spikes number	−0.216	−0.012	−0.492*	−0.111	−0.720**	0.347
	穗粒数 Kernels per spike	−0.086	−0.149	0.027	−0.155	−0.567**	0.705**
	千粒重 1000-kernel weight	−0.017	0.416	0.173	−0.118	−0.210	0.285
	生育期耗水量 Water consumption	−0.386	0.023	−0.074	−0.430	−0.435*	0.419
	水分利用率 Water use efficiency	0.189	0.276	−0.010	0.163	−0.426	0.418
降水量 Precipitation	产量 Yield	0.406	−0.161	0.259	0.349	0.666**	−0.224
	成穗数 Spikes number	0.004	−0.013	0.100	0.074	0.177	−0.266
	穗粒数 Kernels per spike	0.135	0.279	0.276	0.375	0.721**	−0.626**
	千粒重 1000-kernel weight	0.297	−0.389	0.016	0.003	0.459*	0.295
	生育期耗水量 Water consumption	0.399	0.005	0.392	0.505*	0.529*	−0.388
	水分利用率 Water use efficiency	0.057	−0.326	−0.199	−0.210	0.157	0.240

	产量 Yield	成穗数 Spikes number	穗粒数 Kernels per spike	千粒重 1000-kernel weight	生育期耗水量 Water consumption
产量 Yield					
成穗数 Spikes number	0.738**				
穗粒数 Kernels per spike	0.650**	0.340			
千粒重 1000-kernel weight	0.596**	0.230	0.111		
生育期耗水量 Water consumption	0.756**	0.567**	0.763**	0.361	
水分利用率 Water use efficiency	0.303	0.225	−0.231	0.265	−0.272

$r_{0.05}$=0.433, $r_{0.01}$=0.549; *和**分别表示相关性达 0.05 和 0.01 水平。* and ** mean significant correlation at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

3 讨论与结论

随着全球“暖干化”气候变化特征日益明显，播期对小麦生长发育和产量的影响备受关注[19-20]。徐成忠等[9]针对山东省济宁市近 40 年来小麦生育期间和越冬前≥0 ℃积温，提出小麦适播期应推迟到 10 月 5—9 日，暖冬、偏春性品种再推迟 5 d。白洪立等[10]针对山东省兖州市近年来气温持续升高的变化特征，根据冬前壮苗所需 0 ℃以上积温提出，小麦适播期应比 20 世纪 70 年代推迟 5 d 左右。但关于生育期内气象因素的变化报道较少。本研究表明，随播期推迟，旱地小麦生育期缩短，生育期内总积温值变低，日照时数变短，生育期降水量减少；播期对旱地小麦出苗到抽穗期的生育进程影响较大，不同播期的抽穗期和成熟期差异较小。这与裴雪霞等[8]关于播期对水地优质小麦生长发育影响的结果一致。

降水是旱地小麦稳产高产的关键，播期对小麦籽粒产量及水分利用效率有显著影响[21-23]。张敏等[5]、赵青松等[7]、张耀辉等[24]的研究都表明，随播期推迟小麦籽粒产量明显降低，需通过加大播量来提高成穗数获得高产。而前人的研究主要集中在特定年份播期对小麦籽粒产量的影响，关于不同降水年型下播期相关研究甚少。本研究表明，降水年型显著影响旱地小麦产量，丰水年型较平水年型和枯水年型分别提高 100.0%和 135.9%，小麦关键生育期降水对小麦产量有较大促进作用，丰水年型 2014 年度 4—5 月(拔节—抽穗期)降水较多(136.6 mm)，成穗数居中，穗粒数和千粒重高，导致产量最高，平水年型 2013 年度小麦生育期降水少，且集中在 5 月下旬(灌浆期，76.2 mm)，为无效降水，对产量作用小，因此产量和籽粒水分利用率均最低；丰水年型生育期耗水量分别较平水年型和枯水年型高 55.86%和 83.29%，主要与休闲后期降水量大关系密切，从播前土壤贮水量的测定得到验证。不同降水年型小麦适播期不同，丰水年型适播期应在 10 月 4 日左右，可获得高产，产量因素协调，同时生育期耗水量最少，水分利用率较高；平水年型和枯水年型适播期应在 9 月 28 日左右，产量最高，水分利用率也较高。

前人对小麦生育期气温变化与产量及其构成相

关性的研究较多, 对降水和日照时数与旱地小麦产量及生育期耗水量和籽粒水分利用效率的相关性研究甚少。刘新月等[25]研究表明, 起身至拔节期≥0 ℃积温对黄淮旱地小麦产量表现为正效应, 决定因子占 26.17%。本研究表明, 在拔节—抽穗期, 旱地小麦产量和生育期耗水量与积温和日照时数显著负相关, 与降水量显著正相关, 在抽穗—成熟期, 与积温、日照时数显著正相关, 因此拔节—抽穗期低温、寡照、多雨有利于旱地小麦产量构成三因素的协调, 抽穗—成熟期高温、多照、少雨有利于旱地小麦光合产物的积累, 最终提高籽粒产量。本结论可以为丰富中国小麦栽培学理论提供依据, 也有待更长时间的试验进行验证和完善。

参考文献 References

[1] 徐兆飞. 山西小麦[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006: 286–323
Xu Z F. Shanxi Wheat[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006: 286–323

[2] 党建友, 王姣爱, 张晶, 等. 干旱年份播期对旱地冬小麦产量及水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(1): 172–176
Dang J Y, Wang J A, Zhang J, et al. Effect of sowing date on yield and water use efficiency of winter wheat on dry land in arid year[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(1): 172–176

[3] 金善宝. 中国小麦学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996: 29–50
Jin S B. Wheat in China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1996: 29–50

[4] 何刚, 王朝辉, 李富翠, 等. 地表覆盖对旱地小麦氮磷钾需求及生理效率的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(9): 1657–1671
He G, Wang Z H, Li F C, et al. Nitrogen, phosphorus and potassium requirement and their physiological efficiency for winter wheat affected by soil surface managements in dryland[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(9): 1657–1671

[5] 张敏, 王岩岩, 蔡瑞国, 等. 播期推迟对冬小麦产量形成和籽粒品质的调控效应[J]. 麦类作物学报, 2013, 33(2): 325–330
Zhang M, Wang Y Y, Cai R G, et al. Regulating effect of delayed sowing date on yield formation and grain quality of winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2013, 33(2): 325–330

[6] 李彩虹, 冯美臣, 王超, 等. 不同播期冬小麦叶绿素含量的冠层光谱响应研究[J]. 核农学报, 2014, 28(2): 309–316
Li C H, Feng M C, Wang C, et al. Response of canopy spectral on chlorophyll content of winter wheat under different sowing date[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2014, 28(2): 309–316

[7] 赵青松, 高金成, 殷跃军. 不同播期与播量对小麦产量的影响[J]. 耕作与栽培, 2014, (4): 51–52
Zhao Q S, Gao J C, Yin Y J. Effect of different sowing date and seeding dosage on yield of wheat[J]. Tillage and Cultivation, 2014, (4): 51–52

[8] 裴雪霞, 王姣爱, 党建友, 等. 基因型和播期对优质小麦生长发育及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(5): 1109–1115
Pei X X, Wang J A, Dang J Y, et al. Effect of genotype and sowing time on growth, development and yield of high quality wheat[J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2008, 16(5): 1109–1115

[9] 徐成忠, 董兴玉, 杨洪宾, 等. 积温变迁对夏玉米冬小麦两熟制播期的影响[J]. 山东农业科学, 2009, (2): 34–37
Xu C Z, Dong X Y, Yang H B, et al. Effects of accumulated temperature changes on sowing dates of summer maize and winter wheat in double cropping system[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2009, (2): 34–37

[10] 白洪立, 孟淑华, 王立功, 等. 积温变迁对冬小麦夏玉米一年两熟播期的影响[J]. 作物杂志, 2009, (3): 55–58
Bai H L, Meng S H, Wang L G, et al. Effects of changes of accumulated temperature on sowing dates of winter wheat and summer maize[J]. Crops, 2009, (3): 55–58

[11] Ferrise R, Triossi A, Stratonovitch P, et al. Sowing date and nitrogen fertilisation effects on dry matter and nitrogen dynamics for durum wheat: An experimental and simulation study[J]. Field Crops Research, 2010, 117(2/3): 245–257

[12] Tapley M, Ortiz B V, van Santen E, et al. Location, seeding date, and variety interactions on winter wheat yield in southeastern United States[J]. Agronomy Journal, 2013, 105(2): 509–518

[13] 郭明明, 赵广才, 郭文善, 等. 播期对不同筋力型小麦旗叶光合及籽粒灌浆特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(2): 192–197
Guo M M, Zhao G C, Guo W S, et al. Effect of different sowing dates on characteristics of flag leaf photosynthesis and grain filling of wheat cultivars with different gluten[J]. Journal of Triticeae Crops, 2015, 35(2): 192–197

[14] 武永利, 卢淑贤, 王云峰, 等. 近 45 年山西省气候生产潜力时空变化特征分析[J]. 生态环境学报, 2009, 18(2): 567–571
Wu Y L, Lu S X, Wang Y F, et al. Spatial-temporal changing characteristics of the evapotranspiration climate potential productivity in Shanxi Province during last 45 years[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(2): 567–571

[15] 于亚军, 王蕾, 张永清. 晋南地区近 50 年来气温与降水量变化趋势分析[J]. 山西师范大学学报: 自然科学版, 2012, 26(4): 75–79
Yu Y J, Wang L, Zhang Y Q. Analysis on temperature and precipitation variations of the southern Shanxi Province in the last 50 years[J]. Journal of Shanxi Normal University: Natural Science Edition, 2012, 26(4): 75–79

[16] 高文华, 李忠勤, 张明军, 等. 山西晋南地区近 56a 的气候变化特征、突变与周期分析[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(7): 124–127
Gao W H, Li Z Q, Zhang M J, et al. Characteristics and analysis of abrupt and cyclic climate changes in the southern

Shanxi Province in recent 56 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25(7): 124–127

[17] 张俊灵, 孙美荣, 闫金龙, 等. 山西省旱地小麦育种进展与育种策略探讨[J]. 农学学报, 2015, 5(9): 17–21
Zhang J L, Sun M R, Yan J L, et al. Discussion on the progress and strategies of dryland wheat breeding in Shanxi Province[J]. Journal of Agriculture, 2015, 5(9): 17–21

[18] 陶林威, 马洪, 葛芬莉. 陕西省降水特性分析[J]. 陕西气象, 2000, (5): 6–9
Tao L W, Ma H, Ge F L. Analysis of precipitation characteristics in Shaanxi Province[J]. Journal of Shaanxi Meteorology, 2000, (5): 6–9

[19] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis [EB/OL]. http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/

[20] 姚玉璧, 王毅荣, 李耀辉, 等. 中国黄土高原气候暖干化及其对生态环境的影响[J]. 资源科学, 2005, 27(5): 146–152
Yao Y B, Wang Y R, Li Y H, et al. Climate warming and drying and its environmental effects in the Loess Plateau[J]. Resources Science, 2005, 27(5): 146–152

[21] Miralles D J, Ferro B C, Salfer G A. Developmental responses to sowing date in wheat, barley and rapeseed[J]. Field Crops Research, 2001, 71(3): 211–223

[22] Kumar A, Senqar R S. Effect of delayed sowing on yield and proline content of different wheat cultivars[J]. Research on Crops, 2013, 14(2): 409–415

[23] Riaziat A, Soleymani A, Shahrajabian M H. Changes in seed yield and biological yield of six wheat cultivars on the basis of different sowing dates[J]. Journal of Food, Agriculture & Environment, 2012, 10(1): 467–469

[24] 张耀辉, 宋建荣, 岳维云, 等. 陇南雨养旱区播期与密度对冬小麦产量与品质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(6): 74–78
Zhang Y H, Song J R, Yue W Y, et al. Effects of sowing date and planting density on yield and quality of winter wheat in rained dryland areas of Longnan[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(6): 74–78

[25] 刘新月, 裴磊, 卫云宗, 等. 气温变化背景下中国黄淮旱地冬小麦农艺性状的变化特征——以山西临汾为例[J]. 中国农业科学, 2015, 48(10): 1942–1954
Liu X Y, Pei L, Wei Y Z, et al. Agronomic traits variation analysis of Huanghuai dryland winter wheat under temperature change background in China — Taking Linfen, Shanxi as an example[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(10): 1942–1954